

鑄造分野におけるデジタルものづくり（第4報）

久富茂樹*、水谷予志生**、藤井勝敏*

Digital manufacturing in the casting field (IV)

KUDOMI Shigeki*, MIZUTANI Yoshiki** and FUJII Katsutoshi*

県内企業を中心メンバーとした「鑄造分野におけるデジタルものづくり研究会」を設立し、鑄造の効率化、高品質化を目的として、砂型 3D プリンタの活用や木型代替の樹脂模型の活用に取り組んでいる。本年度は、トポロジー最適化を用いて設計した形状について、砂型 3D プリンタを活用した鑄造に取り組んだ。砂型 3D プリンタを活用する際に必要となる砂の除去を考慮した砂型分割を検討して砂型作製を行い、ねずみ鑄鉄の FC200 と銅合金の CAC406 で鑄物を作製した。従来の鑄造方法では作製が困難である複雑な形状でも、砂型 3D プリンタを用いることで、比較的容易に鑄物の作製が可能であり、砂型 3D プリンタの利点の一つを確認できた。

1. はじめに

鑄造の効率化、高品質化を目的として、令和元年度より、県内企業を中心メンバーとした「鑄造分野におけるデジタルものづくり研究会」を設立し、3D プリンタや CAE の活用に取り組んでいる。砂型 3D プリンタを活用した鑄造では、木型を使用する必要がなく、ダイレクトに砂型を作製できる。そのため、リードタイムの短縮、設計自由度の向上といった利点がある¹⁾。従来型の鑄造工程では、木型を作製する企業の減少、職人の高齢化が進んでおり、木型代替として、樹脂 3D プリンタで作製した樹脂模型が活用され始めている²⁾。また、鑄造シミュレーションやトポロジー最適化といった CAE の活用も進んできている³⁾。鑄造シミュレーションは、鑄造欠陥の予測ができるため、試作回数の低減に有効である。また、トポロジー最適化は、必要強度を保ちつつ軽量化を図る製品設計に有効である。

これまでに、砂型 3D プリンタでは、造形データの配置方向によって積層痕の現れ方や幾何公差が異なること、積層痕は鑄物まで転写されること、造形物の取り出しや砂の除去を考慮した製品設計が必要であることがわかった。また、樹脂 3D プリンタで造形した鑄造用模型では、使用する 3D プリンタの造形方式、造形条件によって寸法精度や積層時に生じる積層痕の状態が異なること、量産時に使用する自動砂型造型機でも小ロットであれば実用に耐え得ることを確認した^{4)~6)}。

本年度は、トポロジー最適化で設計した形状について、砂型 3D プリンタを活用した砂型造形を行い、ねずみ鑄鉄の FC200 と銅合金の CAC406 で鑄造を実施したので報告する。

2. トポロジー最適化を用いた形状設計

トポロジー最適化は、設計したい空間にどのように材料を配置すれば最適な構造となるのかを計算する手法である⁷⁾。目的変数が剛性である場合、必要最小限の材料で必要な剛性を満たす形状を得ることができるため、製品の軽量化が期待できるが、計算で得られた形状は複雑な場合も多く、従来工法では製造できないことがある。一方、3D プリンタで造形できる形状の自由度は従来工法に比べてかなり高いため、トポロジー最適化と 3D プリンタとは親和性が高いと言える。砂型 3D プリンタは鑄型の一つである砂型を作製するために開発された機器である。他の 3D プリンタと同様、造形できる形状の自由度は高い。そこで、トポロジー最適化を用いて設計した形状について、砂型 3D プリンタによる鑄造を試みた。トポロジー最適化には、形状構想設計システム CSDS 開発版（株式会社くいと製）を使用した。図 1 に設定条件を示す。今回、試験形状として、四隅を固定し、上面から垂直荷重が加わる部品を想定して設計した。下側の四隅に設置した直方体（以降、足と記す）と上面に設置した荷重面（以降、荷重面と記す）を非設計領域に設定し、その間の空間を設計領域に設定した。設計領域を 20% に削減した際に、最も剛性が高くなる形状を求めた。

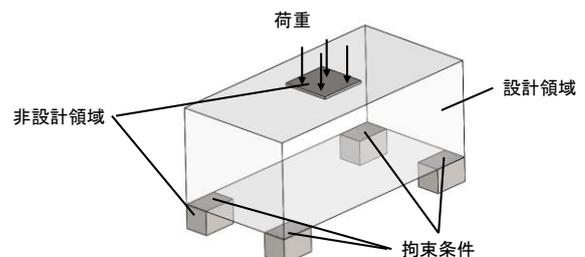


図1 トポロジー最適化の設定条件

* 情報技術部

** 金属部

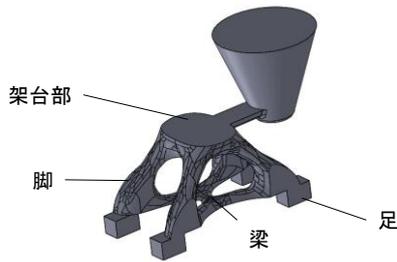


図2 トポロジー最適化形状の铸造用データ

これに、铸造に必要な湯口、湯道の方案を加えた形状を図2に示す。拘束条件を与えた4か所の足から上方に伸びたブロック（以降、脚と記す）が、荷重面下に形成されたブロック（以降、架台部と記す）を支えるような形状になった。下部には4本の脚をつなぐように梁のような形状も形成された（以降、梁と記す）。

3. 砂型作製

3.1 分割の検討

従来の木型を使用した铸造方法では、木型を砂に転写する際、木型を砂型から抜く必要があるため、抜け勾配のある形状にしなければならない。そのため、今回設計した形状を作製する場合、抜け勾配を確保するために、砂型をいくつかに分割したり、空間部分を作り出すために、複雑形状の中子を作製したりする必要がある。このような形状でも、砂型3Dプリンタであれば、木型を使用することがないため、抜け勾配を考慮する必要はなく、中子が必要な部分も一体で造形可能である。しかしながら、今回使用した装置も含めて、砂型3Dプリンタの多くは、結合剤噴射法（バインダージェット方式）であり、砂の中に埋もれた状態で造形される。溶湯が流れ込む空間部分には、バインダが塗布されていない未硬化の砂が充填されているため、その除去が必要である。その際、砂型自体が脆いため、強くたたいたり、引掻いたりすることができない。今回の形状では、途中で狭くなっている部分もあり、砂の除去が困難になることが推測されたので、砂の除去のために、砂型の分割作製について検討した。図3に検討した分割方法を示す。(a)の一体造形砂型は、分割せずに一体で造形する砂型とした。(b)の2分割砂型Aでは、四隅の足の下面で分割した。(c)の2分割砂型Bでは、四隅の足の上面で分割した。(d)の3分割砂型では、架台部上面および、四隅の足の上面で分割した。

3.2 砂型3Dプリンタでの造形

バインダージェット方式の砂型3Dプリンタ

(SCM-10およびSCM-800II：シーメット株式会社製)によって、上記の砂型を作製した。造形後、砂型の空間部に詰まった未硬化の砂をブラシ、針金、エアガンを使用して除去した。ブラシや針金を使用する際は、硬化し

ている砂型の壁面に強く当てて砂型を崩壊させることがないように作業を行った。

3.3 排砂状態の確認

砂型内部の除去状態は目視では確認できないため、X線CT（TOSCANER-32300μFD：東芝ITコントロールシステム株式会社製）で撮影し砂型内部の排砂状態を確認した。一体造形砂型の架台部上面から12mm下の水平断面でのCT画像を図4(a)に示す。画像中で、白っぽく写っている部分は砂であり、黒っぽく写っている部分は空気である。湯口、湯道、架台部の一部までは砂の除去ができていたが、脚部分からは砂の除去ができなかった。一体造形砂型の場合は、砂の出口が湯口部分の一角のみである。足部に至るまでには屈曲した形状になっ

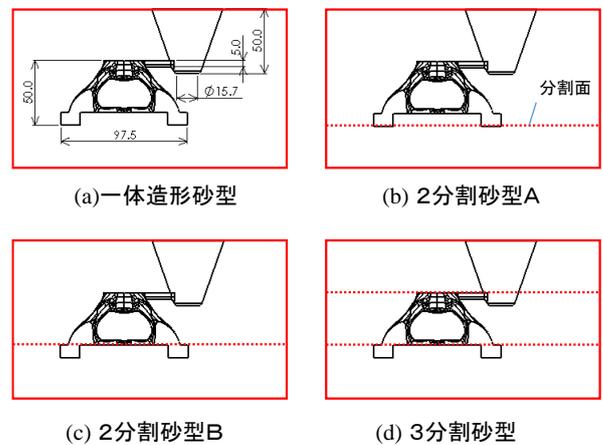


図3 砂型分割方法の検討

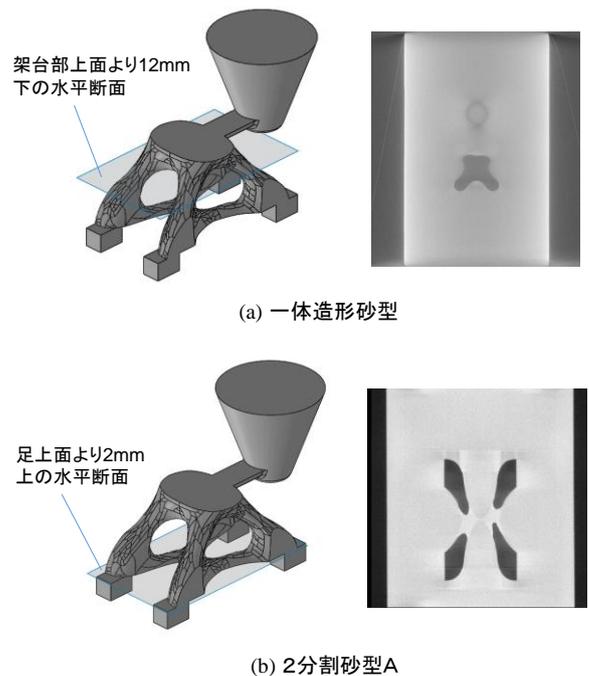


図4 砂型のX線CT測定

ているため、針金を使用しての除去作業は実施しなかった。また、2分割砂型 A の足上面から 2mm 上の水平断面での CT 画像を図 4(b)に示す。2分割砂型 A の上型では、本来、繋がっているはずの梁部分が繋がっておらず、未硬化の砂が詰まっていることを確認できた。この砂型では、湯口部分と足の下側から砂の除去を行うことになる。脚部分や架台部の未硬化砂は足から針金を挿入したり、エアを送り込んだりすることで概ね除去することができたが、梁部分は、足から直角に曲がり、水平方向に伸びた形状のため、針金を使用しての除去作業は実施しなかった。砂型に振動を加えたり、足からエアを送り込んだりすることによって、梁部分の未硬化砂の除去を試みたが、梁の途中までしか除去できなかった。梁の狭くなっている部分は厚さが約 1.5mm であり、形状によっては、この程度に狭くなると砂の除去が困難になることがわかった。2分割砂型 B と 3分割砂型は、一部で壁面が崩れた箇所があったが、概ね良好に未硬化の砂の除去ができていた。砂型 3D プリンタを活用する際には、砂の除去を考慮した砂型設計が重要であることがわかった。

4. 注湯試験

4. 1 FC200 と CAC406 での注湯

未硬化の砂の除去が比較的良好にできた 3分割砂型と 2分割砂型 B を使用して注湯試験を実施した。注湯は、本研究会参加企業のうちの 2社が担当した。表 1 に注湯条件を示す。注湯後、冷却してから砂型を崩して铸造品を取り出し、ショットブラストを行って、表面の砂や汚れを除去した。

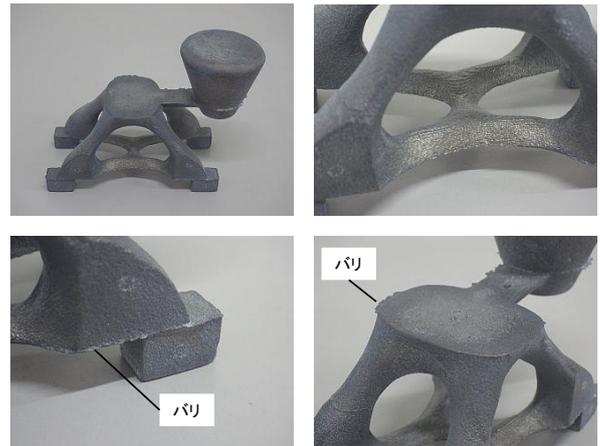
図 5(a)に FC200 の铸物、図 5(b)に CAC406 の铸物の外観を示す。FC200 の铸物では、外観からは、欠陥は見当たらなかった。梁の細くなっている形状も铸造できていた。ただし、2つの分割面では若干のバリができた。CAC406 の铸物では、梁の中央部で割れが生じた。また、堰付近での引け巣の発生と、製品部上面の中央部での外引け巣の発生が認められた。分割面である四隅の非設計領域の上面部には若干バリが発生した。架台部上面の突起は、砂型作製時に砂型壁面の砂がこぼれて铸物に転写されたものである。

4. 2 铸物の形状測定

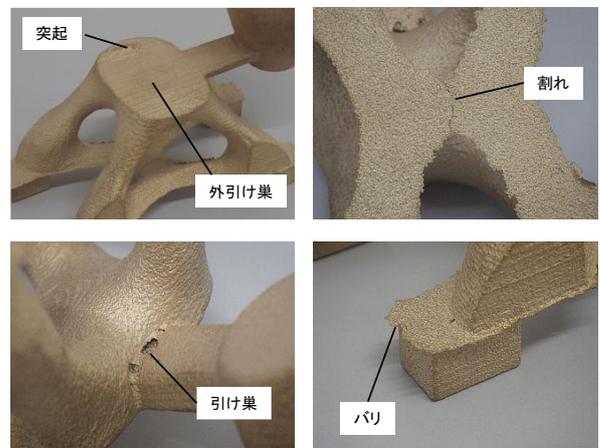
铸造品を非接触三次元測定機 (ATOS Compact Scan : GOM 社製) で測定した。砂型作製に使用した設計データと測定データについて、製品部分のみのデータを使用

表 1 注湯条件

铸物材料	使用砂型	注湯温度	注湯時間
FC200	3分割砂型	約1,350℃	約1s
CAC406	2分割砂型B	約1,200℃	約1s

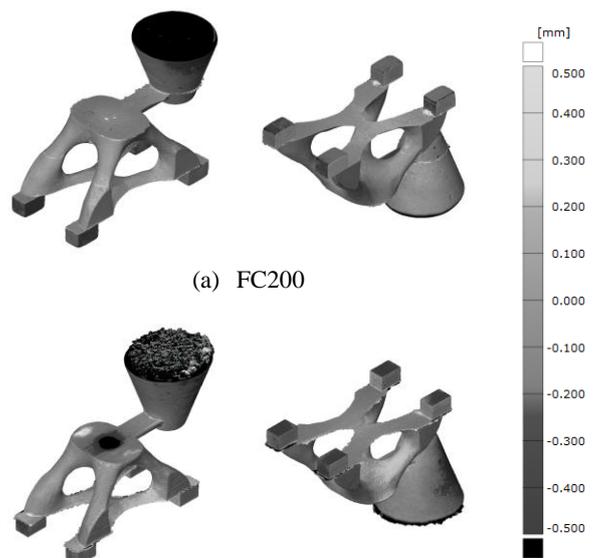


(a) FC200



(b) CAC406

図 5 铸物の外観



(b) CAC406

図 6 铸物の形状測定

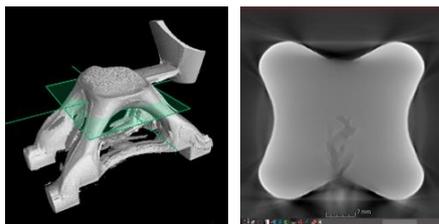
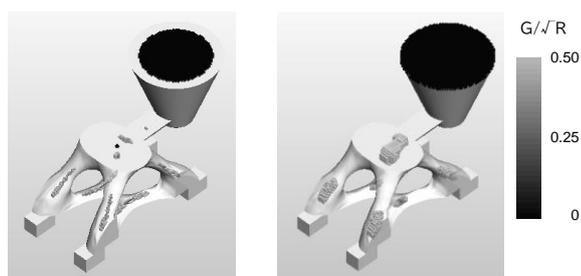


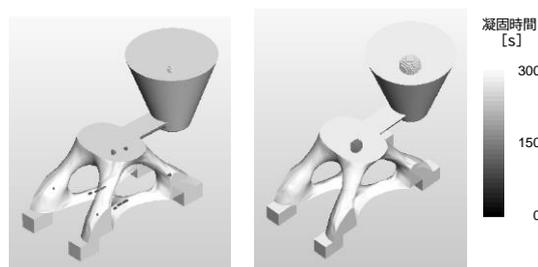
図7 X線CTによる内部欠陥評価 (CAC406)



FC200

CAC406

(a) G/\sqrt{R}



FC200

CAC406

(b) ホットスポット

図8 凝固解析結果

した部分ベストフィットによる位置合わせを行い、表面偏差をグラデーションマップ表示した結果を図6に示す。設計データは、鋳物の収縮率を1%と仮定し、砂型作製に使用したデータを0.99倍したデータを使用した。

FC200の鋳物とCAC406の鋳物の両者とも、四隅の足の部分で偏差が±0.5mm程度であったが、それ以外は±0.2mm程度の偏差に収まった。CAC406の鋳物については、架台部上面に外引け巣が発生した部分で偏差の絶対値が大きくなっており、最も外引け巣が大きい部分で深さ1.0mmであった。

4.3 欠陥の評価

X線CTにより、試作した鋳物の内部欠陥を観察した。その結果、FC200の鋳物では欠陥は見られなかったが、CAC406の鋳物では一部に欠陥があった。CAC406の鋳物の架台部上面から9.5mm下の水平断面のCT画像を図7に示す。外観観察で認められた堰付近の引け巣は内部まで伸展していた。この結果の考察のため、鋳造シミュレーション

(JSCAST:クオリカ株式会社製)による凝固解析を行なった。図8(a)に G/\sqrt{R} の結果を示す。 G/\sqrt{R} は引け巣欠陥評価の指標の一つで、温度勾配(G)と冷却速度(R)から引け巣欠陥を予測するパラメータ⁸⁾である。数値が小さいほど引け巣の発生が高まるとされている。FC200に比較して、CAC406は G/\sqrt{R} が低い部分が多くなっている。堰付近から架台部の中央部にかけて低くなっており、実際の試験結果と合致していた。ただし、脚の足に近い部分でも G/\sqrt{R} が低くなったが、実際の鋳物ではこの部分に欠陥は認められなかった。図8(b)にホットスポットの結果を示す。FC200では大きなホットスポットはないが、CAC406では架台部の中心に比較的大きなホットスポットがあった。一方、脚部にはホットスポットはなかった。鋳造シミュレーションでは、複数の指標を併せて評価することが有効であると思われる。

5. まとめ

トポロジー最適化で設計した形状について、砂型3Dプリンタを活用した砂型作製を行い、FC200とCAC406で鋳物を作製した。従来の鋳造方法では作製が困難である形状でも砂型3Dプリンタを用いることで鋳物の作製が可能であり、砂型3Dプリンタの利点の一つを確認できた。ただし、砂型3Dプリンタは造形後に未硬化の砂の除去を行う必要があり、屈曲した形状や狭くなっている形状の場合、砂の除去が困難であるので、砂の除去を考慮した方案設計や砂型の分割が重要である。

【謝辞】

本研究を遂行するにあたり、トポロジー最適化ソフトウェアの使用許諾をいただいた株式会社くいんと様に感謝いたします。砂型3Dプリンタの造形指導及びアドバイスをいただいた三重県工業研究所金属研究室の皆様へ感謝いたします。注湯試験に協力していただき、ご意見をいただいた株式会社高橋鋳造所の皆様、株式会社KVKの皆様へ感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 岡根ら, 鋳造工学, 第90巻, 第6号, pp266-273, 2018
- 2) 金森ら, 三重県工業研究所研究報告, No.40, pp61-66, 2016
- 3) 新藤, 日本機械学会誌, Vol.123, pp22-26, 2020
- 4) 久富ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告, No1, pp17-20, 2020
- 5) 久富ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告, No2, pp27-30, 2021
- 6) 久富ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告, No3, pp23-26, 2022
- 7) 西脇ら, トポロジー最適化, 丸善出版, 2013
- 8) 新山ら, 鋳物, 第54巻, 第8号, pp507-517, 1982